

RÉFLEXIONS
SUR LA
PUISSANCE MOTRICE
DU FEU
ET
SUR LES MACHINES

PROPRES A DÉVELOPPER CETTE PUISSANCE,

PAR S. CARNOT,
ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.

A PARIS,
CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,
QUAI DES AUGUSTINS, N°. 55.

1824.

RÉFLEXIONS

SUR LA

PUISSANCE MOTRICE

DU FEU.

PERSONNE n'ignore que la chaleur peut être la cause du mouvement , qu'elle possède même une grande puissance motrice : les machines à vapeur , aujourd'hui si répandues , en sont une preuve parlante à tous les yeux.

C'est à la chaleur que doivent être attribués les grands mouvemens qui frappent nos regards sur la terre ; c'est à elle que sont dues les agitations de l'atmosphère , l'ascension des nuages , la chute des pluies et des autres météores , les courans d'eau qui sillonnent la surface du globe et dont l'homme est parvenu à employer pour son usage une faible partie ; enfin les tremblemens de terre , les éruptions volcaniques , reconnaissent aussi pour cause la chaleur.

C'est dans cet immense réservoir que nous pouvons puiser la force mouvante nécessaire à

nos besoins ; la nature, en nous offrant de toutes parts le combustible , nous a donné la faculté de faire naître en tous temps et en tous lieux la chaleur et la puissance motrice qui en est la suite. Développer cette puissance , l'approprier à notre usage, tel est l'objet des machines à feu.

L'étude de ces machines est du plus haut intérêt, leur importance est immense, leur emploi s'accroît tous les jours. Elles paraissent destinées à produire une grande révolution dans le monde civilisé. Déjà la machine à feu exploite nos mines , fait mouvoir nos navires , creuse nos ports et nos rivières , forge le fer , façonne les bois , écrase les grains , file et ourdit nos étoffes , transporte les plus pesans fardeaux , etc. Elle semble devoir un jour servir de moteur universel et obtenir la préférence sur la force des animaux , les chutes d'eau et les courans d'air. Elle a , sur le premier de ces moteurs, l'avantage de l'économie ; sur les deux autres , l'avantage inappréciable de pouvoir s'employer en tous temps et en tous lieux, et de ne jamais souffrir d'interruption dans son travail.

Si quelque jour les perfectionnemens de la machine à feu s'étendent assez loin pour la rendre peu coûteuse en établissement et en combustible, elle réunira toutes les qualités désirables , et fera prendre aux arts industriels

un essor dont il serait difficile de prévoir toute l'étendue.

Non seulement, en effet, un moteur puissant et commode, que l'on peut se procurer ou transporter partout, se substitue aux moteurs déjà en usage; mais il fait prendre aux arts où on l'applique une extension rapide, il peut même créer des arts entièrement nouveaux.

Le service le plus signalé que la machine à feu ait rendu à l'Angleterre est sans contre-dit d'avoir ranimé l'exploitation de ses mines de houille, devenue languissante et qui menaçait de s'éteindre entièrement à cause de la difficulté toujours croissante des épuisemens et de l'extraction du combustible (1). On doit mettre sur le second rang les services rendus à la fabrication du fer, tant par la houille, offerte avec abondance et substituée aux bois au moment où

(1) On peut affirmer que l'extraction de la houille a décuplé en Angleterre depuis l'invention des machines à feu. Il en est à peu près de même de l'extraction du cuivre, de l'étain et du fer. L'effet produit il y a un demi-siècle par la machine à feu sur les mines d'Angleterre se répète aujourd'hui sur les mines d'or et d'argent du nouveau monde, mines dont l'exploitation déclinait de jour en jour, principalement à cause de l'insuffisance des moteurs employés aux épuisemens et à l'extraction des minerais.

ceux-ci commençaient à s'épuiser , que par les machines puissantes de toutes espèces dont l'emploi de la machine à feu a permis ou facilité l'usage.

Le fer et le feu sont , comme on sait , les alimens , les soutiens des arts mécaniques. Il n'existe peut-être pas en Angleterre un établissement d'industrie dont l'existence ne soit fondée sur l'usage de ces agens et qui ne les emploie avec profusion. Enlever aujourd'hui à l'Angleterre ses machines à vapeur , ce serait lui ôter à la fois la houille et le fer ; ce serait tarir toutes ses sources de richesses , ruiner tous ses moyens de prospérité ; ce serait anéantir cette puissance colossale. La destruction de sa marine , qu'elle regarde comme son plus ferme appui , lui serait peut-être moins funeste.

La navigation sûre et rapide des bâtimens à vapeur peut être regardée comme un art entièrement nouveau dû aux machines à feu. Déjà cet art a permis l'établissement de communications promptes et régulières sur les bras de mer , sur les grands fleuves de l'ancien et du nouveau continent. Il a permis de parcourir des régions encore sauvages , où naguère on pouvait à peine pénétrer ; il a permis de porter les fruits de la civilisation sur des points du globe où ils eussent été attendus encore

bien des années. La navigation due aux machines à feu rapproche en quelque sorte les unes des autres les nations les plus lointaines. Elle tend à réunir entre eux les peuples de la terre comme s'ils habitaient tous une même contrée. Diminuer en effet le temps, les fatigues, les incertitudes et les dangers des voyages, n'est-ce pas abréger beaucoup les distances (1)?

La découverte des machines à feu a dû, comme la plupart des inventions humaines, sa naissance à des essais presque informes, essais qui ont été attribués à diverses personnes et dont on ne connaît pas bien le véritable auteur. C'est au reste moins dans ces premiers essais que consiste la principale découverte, que dans les perfectionnemens successifs qui ont amené les machines à feu à l'état où nous les voyons aujourd'hui. Il y a à peu près autant de distance entre les premiers appareils où l'on a développé la force expansive de la

(1) Nous disons diminuer les dangers des voyages : en effet, quoique l'emploi de la machine à feu sur un navire offre quelques dangers que l'on s'est beaucoup exagérés, ils sont compensés et au delà par la faculté de se tenir toujours sur une route frayée et bien connue, de résister à l'effort des vents lorsqu'ils poussent le navire contre les côtes, contre les bas-fonds ou contre les écueils.

vapeur et les machines actuelles , qu'entre le premier radeau que les hommes aient formé et le vaisseau de haut bord.

Si l'honneur d'une découverte appartient à la nation où elle a acquis tout son accroissement , tous ses développemens , cet honneur ne peut être ici refusé à l'Angleterre : Savery , Newcomen , Smeathon , le célèbre Watt , Woolf , Trevetick et quelques autres ingénieurs anglais , sont les véritables créateurs de la machine à feu ; elle a acquis entre leurs mains tous ses degrés successifs de perfectionnement. Il est naturel , au reste , qu'une invention prenne naissance et surtout se développe , se perfectionne , là où le besoin s'en fait le plus impérieusement sentir.

Malgré les travaux de tous genres entrepris sur les machines à feu , malgré l'état satisfaisant où elles sont aujourd'hui parvenues , leur théorie est fort peu avancée , et les essais d'amélioration tentés sur elles sont encore dirigés presque au hasard.

L'on a souvent agité la question de savoir si la puissance motrice (1) de la chaleur est

(1) Nous nous servons ici de l'expression puissance motrice pour désigner l'effet utile qu'un moteur est capable de produire. Cet effet peut toujours être assimilé à l'élé-

limitée, ou si elle est sans bornes; si les perfectionnemens possibles des machines à feu ont un terme assignable, terme que la nature des choses empêche de dépasser par quelque moyen que ce soit, ou si au contraire ces perfectionnemens sont susceptibles d'une extension indéfinie. L'on a aussi cherché long-temps, et l'on cherche encore aujourd'hui, s'il n'existerait pas des agens préférables à la vapeur d'eau pour développer la vapeur motrice du feu; si l'air atmosphérique, par exemple, ne présenterait pas, à cet égard, de grands avantages. Nous nous proposons de soumettre ici ces questions à un examen réfléchi.

Le phénomène de la production du mouvement par la chaleur n'a pas été considéré sous un point de vue assez général. On l'a considéré seulement dans des machines dont la nature et le mode d'action ne lui permettaient pas de prendre toute l'étendue dont il est susceptible. Dans de pareilles machines le phénomène se trouve en quelque sorte tronqué, incomplet; il devient difficile de reconnaître ses principes et d'étudier ses lois.

vation d'un poids à une certaine hauteur; il a, comme on sait, pour mesure le produit du poids multiplié par la hauteur dont il est censé élevé.

Pour envisager dans toute sa généralité le principe de la production du mouvement par la chaleur, il faut le concevoir indépendamment d'aucun mécanisme, d'aucun agent particulier; il faut établir des raisonnemens applicables, non seulement aux machines à vapeur (1), mais à toute machine à feu imaginable, quelle que soit la substance mise en œuvre et quelle que soit la manière dont on agisse sur elle.

Les machines qui ne reçoivent pas leur mouvement de la chaleur, celles qui ont pour moteur la force des hommes ou des animaux, une chute d'eau, un courant d'air, etc., peuvent être étudiées jusque dans leurs moindres détails par la théorie mécanique. Tous les cas sont prévus, tous les mouvemens imaginables sont soumis à des principes généraux solidement établis et applicables en toute circonstance. C'est là le caractère d'une théorie complète. Une semblable théorie manque évidemment pour les machines à feu. On ne la possédera que lorsque les lois de la physique seront assez étendues, assez généralisées, pour faire

(1) Nous distinguons ici la machine à vapeur de la machine à feu en général; celle-ci peut faire usage d'un agent quelconque, de la vapeur d'eau ou de tout autre, pour réaliser la puissance motrice de la chaleur.

connaître à l'avance tous les effets de la chaleur agissant d'une manière déterminée sur un corps quelconque.

Nous supposerons dans ce qui va suivre une connaissance au moins superficielle des diverses parties qui composent une machine à vapeur ordinaire. Ainsi nous jugeons inutile d'expliquer ce que c'est que foyer, chaudière, cylindre à vapeur, piston, condenseur, etc.

La production du mouvement dans les machines à vapeur est toujours accompagnée d'une circonstance sur laquelle nous devons fixer l'attention. Cette circonstance est le rétablissement d'équilibre dans le calorique, c'est-à-dire son passage d'un corps où la température est plus ou moins élevée à un autre où elle est plus basse. Qu'arrive-t-il en effet dans une machine à vapeur actuellement en activité? Le calorique, développé dans le foyer par l'effet de la combustion, traverse les parois de la chaudière, vient donner naissance à de la vapeur, s'y incorpore en quelque sorte. Celle-ci, l'entraînant avec elle, la porte d'abord dans le cylindre, où elle remplit un office quelconque, et de là dans le condenseur, où elle se liquéfie par le contact de l'eau froide qui s'y rencontre. L'eau froide du condenseur s'empare donc en dernier résultat du calorique développé par la combus-

tion. Elle s'échauffe par l'intermédiaire de la vapeur, comme si elle eût été placée directement sur le foyer. La vapeur n'est ici qu'un moyen de transporter le calorique ; elle remplit le même office que dans le chauffage des bains par la vapeur, à l'exception que dans le cas où nous sommes son mouvement est rendu utile.

L'on reconnaît facilement, dans les opérations que nous venons de décrire, le rétablissement d'équilibre dans le calorique, son passage d'un corps plus ou moins échauffé à un corps plus froid. Le premier de ces corps est ici l'air brûlé du foyer, le second est l'eau de condensation. Le rétablissement d'équilibre du calorique se fait entre eux, si ce n'est complètement, du moins en partie : car, d'une part, l'air brûlé, après avoir rempli son office, après avoir enveloppé la chaudière, s'échappe par la cheminée avec une température bien moindre que celle qu'il avait acquise par l'effet de la combustion ; et, d'autre part, l'eau du condenseur, après avoir liquéfié la vapeur, s'éloigne de la machine avec une température supérieure à celle qu'elle y avait apportée.

La production de la puissance motrice est donc due, dans les machines à vapeur, non à une consommation réelle du calorique, *mais à son transport d'un corps chaud à un corps*

froid, c'est-à-dire à son rétablissement d'équilibre, équilibre supposé rompu par quelque cause que ce soit, par une action chimique, telle que la combustion, ou par toute autre. Nous verrons bientôt que ce principe est applicable à toute machine mise en mouvement par la chaleur.

D'après ce principe, il ne suffit pas, pour donner naissance à la puissance motrice, de produire de la chaleur : il faut encore se procurer du froid ; sans lui la chaleur serait inutile. Et en effet, si l'on ne rencontrait autour de soi que des corps aussi chauds que nos foyers, comment parviendrait-on à condenser la vapeur ? où la placerait-on une fois qu'elle aurait pris naissance ? Il ne faudrait pas croire que l'on pût, ainsi que cela se pratique dans certaines machines (1), la rejeter dans l'atmosphère : l'atmosphère ne la recevrait pas. Il ne la reçoit, dans l'état actuel des choses, que parce qu'il remplit pour elle l'office d'un vaste condenseur, parce qu'il se trouve à une température

(1) Certaines machines à haute pression rejettent la vapeur dans l'atmosphère, au lieu de la condenser : on les emploie particulièrement dans les lieux où il serait difficile de se procurer un courant d'eau froide suffisant pour opérer la condensation.

plus froide ; autrement il en serait bientôt rempli, ou plutôt il en serait d'avance saturé (1).

Partout où il existe une différence de température, partout où il peut y avoir rétablissement d'équilibre du calorique, il peut y avoir aussi production de puissance motrice. La vapeur d'eau est un moyen de réaliser cette puissance, mais elle n'est pas le seul : tous les corps de la nature peuvent être employés à cet usage;

(1) L'existence de l'eau à l'état liquide, admise nécessairement ici, puisque sans elle les machines à vapeur ne pourraient pas s'alimenter, suppose l'existence d'une pression capable d'empêcher cette eau de se vaporiser, par conséquent d'une pression égale ou supérieure à la tension de la vapeur, eu égard à la température. Si une pareille pression n'était pas exercée par l'air atmosphérique, il s'élèverait à l'instant une quantité de vapeur d'eau suffisante pour l'exercer sur elle-même, et il faudrait toujours surmonter cette pression, pour rejeter la vapeur des machines dans la nouvelle atmosphère. Or cela équivaldrait évidemment à surmonter la tension qui reste à la vapeur après sa condensation effectuée par les moyens ordinaires.

Si une température très-élevée régnait à la surface de notre globe, comme il ne paraît pas douteux qu'elle règne dans son intérieur, toutes les eaux de l'Océan existeraient en vapeur dans l'atmosphère, et il ne s'en rencontrerait aucune portion à l'état liquide.

tous sont susceptibles de changemens de volume , de contractions et de dilatations successives par des alternatives de chaleur et de froid; tous sont capables de vaincre , dans leurs changemens de volume , certaines résistances et de développer ainsi la puissance motrice. Un corps solide , une barre métallique , par exemple , alternativement chauffée et refroidie , augmente et diminue de longueur , et peut mouvoir des corps fixés à ses extrémités. Un liquide alternativement chauffé et refroidi augmente et diminue de volume et peut vaincre des obstacles plus ou moins grands opposés à sa dilatation. Un fluide aériforme est susceptible de changemens considérables de volume par les variations de température : s'il est renfermé dans une capacité extensible , telle qu'un cylindre muni d'un piston , il produira des mouvemens d'une grande étendue. Les vapeurs de tous les corps susceptibles de passer à l'état gazeux , de l'alcool , du mercure , du soufre , etc. , pourraient remplir le même office que la vapeur d'eau. Celle-ci , alternativement chauffée et refroidie , produirait de la puissance motrice à la manière des gaz permanens , c'est-à-dire sans jamais retourner à l'état liquide. La plupart de ces moyens ont été proposés , plusieurs même ont

été essayés , quoique ce soit jusqu'ici sans succès remarquable.

Nous avons fait voir que , dans les machines à vapeur , la puissance motrice est due à un rétablissement d'équilibre dans le calorique : cela a lieu , non seulement pour les machines à vapeur , mais aussi pour toute machine à feu , c'est-à-dire pour toute machine dont le calorique est le moteur. La chaleur ne peut évidemment être une cause de mouvement qu'en vertu des changemens de volume ou de forme qu'elle fait subir aux corps ; ces changemens ne sont pas dus à une constance de température , mais bien à des alternatives de chaleur et de froid : or , pour échauffer une substance quelconque , il faut un corps plus chaud qu'elle ; pour la refroidir , il faut un corps plus froid. On prend nécessairement du calorique au premier de ces corps pour le transmettre au second par le moyen de la substance intermédiaire. C'est là rétablir , ou du moins travailler à rétablir , l'équilibre du calorique.

Il est naturel de se faire ici cette question à la fois curieuse et importante : La puissance motrice de la chaleur est-elle immuable en quantité , ou varie-t-elle avec l'agent dont on fait usage pour la réaliser avec la substance inter-

médiaire, choisie comme sujet d'action de la chaleur ?

Il est clair que cette question ne peut être faite que pour une quantité de calorique donnée (1), la différence des températures étant également donnée. L'on dispose, par exemple, d'un corps A, maintenu à la température 100°, et d'un autre corps B, maintenu à la température 0°, et l'on demande quelle quantité de puissance motrice peut naître par le transport d'une portion donnée de calorique (par exemple celle qui est nécessaire pour fondre un kilogramme de glace) du premier de ces corps au second ; on demande si cette quantité de puissance motrice est nécessairement limitée, si elle varie avec la substance employée à la réaliser, si la vapeur d'eau offre à cet égard plus ou moins d'avantage que la vapeur d'al-

(1) Nous jugeons inutile d'expliquer ici ce que c'est que quantité de calorique ou quantité de chaleur (car nous employons indifféremment les deux expressions), ni de décrire comment on mesure ces quantités par le calorimètre. Nous n'expliquerons pas non plus ce que c'est que chaleur latente, degré de température, chaleur spécifique, etc. : le lecteur doit être familiarisé avec ces expressions par l'étude des traités élémentaires de physique ou de chimie.

cool, de mercure, qu'un gaz permanent ou que toute autre substance.

Nous essaierons de résoudre ces questions en faisant usage des notions précédemment établies.

L'on a remarqué plus haut ce fait évident par lui-même, ou qui du moins devient sensible dès que l'on réfléchit aux changemens de volume occasionés par la chaleur : *Partout où il existe une différence de température, il peut y avoir production de puissance motrice.* Réciproquement partout où l'on peut consommer de cette puissance, il est possible de faire naître une différence de température, il est possible d'occasioner une rupture d'équilibre dans le calorique. La percussion, le frottement des corps ne sont-ils pas en effet des moyens d'élever leur température, de la faire arriver spontanément à un degré plus haut que celui des corps environnans, et par conséquent de produire une rupture d'équilibre dans le calorique, là où existait auparavant cet équilibre? C'est un fait d'expérience que la température des fluides gazeux s'élève par la compression et s'abaisse par la raréfaction. Voilà un moyen certain de changer la température des corps et de rompre l'équilibre du calorique autant de fois qu'on le voudra avec la même substance. La

vapeur d'eau employée d'une manière inverse de celle où on l'emploie dans les machines à vapeur, peut aussi être regardée comme un moyen de rompre l'équilibre du calorique. Pour s'en convaincre, il suffit de réfléchir attentivement à la manière dont se développe la puissance motrice par l'action de sa chaleur sur la vapeur d'eau. Concevons deux corps A et B entretenus chacun à une température constante, celle de A étant plus élevée que celle de B : ces deux corps, auxquels on peut donner ou enlever de la chaleur sans faire varier leur température, feront les fonctions de deux réservoirs indéfinis de calorique. Nous nommerons le premier foyer et le second réfrigérant.

Si l'on veut donner naissance à de la puissance motrice par le transport d'une certaine quantité de chaleur du corps A au corps B, l'on pourra procéder de la manière suivante :

1°. Emprunter du calorique au corps A pour en former de la vapeur, c'est-à-dire faire remplir à ce corps les fonctions du foyer, ou plutôt du métal composant la chaudière, dans les machines ordinaires : nous supposerons ici que la vapeur prend naissance à la température même du corps A.

2°. La vapeur ayant été reçue dans une capacité extensible, telle qu'un cylindre muni

d'un piston, augmenter le volume de cette capacité et par conséquent aussi celui de la vapeur. Ainsi raréfiée, elle descendra spontanément de température, comme cela arrive pour tous les fluides élastiques : admettons que la raréfaction soit poussée jusqu'au point où la température devient précisément celle du corps B.

3°. Condenser la vapeur en la mettant en contact avec le corps B, et en exerçant en même temps sur elle une pression constante, jusqu'à ce qu'elle soit entièrement liquéfiée. Le corps B remplit ici le rôle de l'eau d'injection dans les machines ordinaires, avec cette différence qu'il condense la vapeur sans se mêler avec elle et sans changer lui-même de température (1).

(1) On s'étonnera peut-être ici que le corps B se trouvant à la même température que la vapeur puisse la condenser : sans doute cela n'est pas rigoureusement possible ; mais la plus petite différence de température déterminera la condensation, ce qui suffit pour établir la justesse de notre raisonnement. C'est ainsi que, dans le calcul différentiel, il suffit que l'on puisse concevoir les quantités négligées indéfiniment réductibles par rapport aux quantités conservées dans les équations, pour acquérir la certitude du résultat définitif.

Le corps B condense la vapeur sans changer lui-même de température : cela résulte de notre supposition : Nous avons admis que ce corps était maintenu à une tempéra-

Les opérations que nous venons de décrire eussent pu être faites dans un sens et dans un ordre inverse. Rien n'empêchait de former de la vapeur avec le calorique du corps B , et à la température de ce corps , de la comprimer de manière à lui faire acquérir la température du corps A , enfin de la condenser par son contact avec ce dernier corps , et cela en continuant la compression jusqu'à une liquéfaction complète.

Par nos premières opérations , il y avait eu à la fois production de puissance motrice et transport du calorique du corps A au corps B ;

ture constante. On lui enlève le calorique à mesure que la vapeur le lui fournit. C'est le cas où se trouve le métal du condenseur lorsque la liquéfaction de la vapeur s'exécute en appliquant l'eau froide extérieurement, chose pratiquée autrefois dans plusieurs machines. C'est ainsi que l'eau d'un réservoir pourrait être maintenue à un niveau constant, si le liquide s'écoulait d'un côté tandis qu'il arrive de l'autre.

On pourrait même concevoir les corps A et B se maintenant d'eux-mêmes à une température constante, quoique pouvant perdre ou acquérir certaines quantités de chaleur. Si , par exemple, le corps A était une masse de vapeur prête à se liquéfier, et le corps B une masse de glace prête à se fondre , ces corps pourraient, comme on sait, fournir ou recevoir du calorique sans changer de degré thermométrique.

par les opérations inverses , il y a à la fois dépense de puissance motrice et retour du calorique du corps B au corps A. Mais si l'on a agi de part et d'autre sur la même quantité de vapeur , s'il ne s'est fait aucune perte ni de puissance motrice ni de calorique , la quantité de puissance motrice produite dans le premier cas sera égale à celle qui aura été dépensée dans le second , et la quantité de calorique passée , dans le premier cas , du corps A au corps B sera égale à la quantité qui repasse , dans le second , du corps B au corps A , de sorte qu'on pourrait faire un nombre indéfini d'opérations alternatives de ce genre sans qu'il y eût en somme ni puissance motrice produite , ni calorique passé d'un corps à l'autre.

Or , s'il existait des moyens d'employer la chaleur préférables à ceux dont nous avons fait usage , c'est-à-dire s'il était possible , par quelque méthode que ce fût , de faire produire au calorique une quantité de puissance motrice plus grande que nous ne l'avons fait par notre première série d'opérations , il suffirait de distraire une portion de cette puissance pour faire remonter , par la méthode qui vient d'être indiquée , le calorique du corps B au corps A , du réfrigérant au foyer , pour rétablir les choses dans leur état primitif et se mettre par-là en me-

sure de recommencer une opération entièrement semblable à la première et ainsi de suite : ce serait là , non seulement le mouvement perpétuel , mais une création indéfinie de force motrice sans consommation ni de calorique ni de quelque autre agent que ce soit. Une semblable création est tout-à-fait contraire aux idées reçues jusqu'à présent , aux lois de la mécanique et de la saine physique ; elle est inadmissible (1). On doit donc conclure que le

(1) On objectera peut-être ici que le mouvement perpétuel , démontré impossible par les seules actions mécaniques , ne l'est peut-être pas lorsqu'on emploie l'influence soit de la chaleur , soit de l'électricité ; mais peut-on concevoir les phénomènes de la chaleur et de l'électricité comme dus à autre chose qu'à des mouvemens quelconques de corps , et comme tels ne doivent-ils pas être soumis aux lois générales de la mécanique ? Ne sait-on pas d'ailleurs *à posteriori* que toutes les tentatives faites pour produire le mouvement perpétuel par quelque moyen que ce soit ont été infructueuses ? Que l'on n'est jamais parvenu à produire un mouvement véritablement perpétuel , c'est-à-dire un mouvement qui se continuât toujours sans altération dans les corps mis en œuvre pour le réaliser ?

L'on a regardé quelquefois l'appareil électromoteur (la pile de Volta) comme capable de produire le mouvement perpétuel ; on a cherché à réaliser cette idée en construisant des piles sèches , prétendues inaltérables. Mais , quoi que l'on ait pu faire , l'appareil a toujours

maximum de puissance motrice résultant de l'emploi de la vapeur est aussi le maximum de puissance motrice réalisable par quelque moyen que ce soit. Nous donnerons, au reste, bientôt une seconde démonstration plus rigoureuse de ce théorème. Celle-ci ne doit être considérée que comme un aperçu. (V. pag. 29).

On est en droit de nous faire, au sujet de la proposition qui vient d'être énoncée, la question suivante : Quel est ici le sens du mot

éprouvé des détériorations sensibles, lorsque son action a été soutenue pendant un certain temps avec quelque énergie.

L'acception générale et philosophique des mots *mouvement perpétuel* doit comprendre, non pas seulement un mouvement susceptible de se prolonger indéfiniment après une première impulsion reçue, mais l'action d'un appareil, d'un assemblage quelconque, capable de créer la puissance motrice en quantité illimitée, capable de tirer successivement du repos tous les corps de la nature, s'ils s'y trouvaient plongés, de détruire en eux le principe de l'inertie, capable enfin de puiser en lui-même les forces nécessaires pour mouvoir l'univers tout entier, pour prolonger, pour accélérer incessamment son mouvement. Telle serait une véritable création de puissance motrice. Si elle était possible, il serait inutile de chercher dans les courans d'eau et d'air, dans les combustibles, cette puissance motrice; nous en aurions à notre disposition une source intarissable où nous pourrions puiser à volonté.

maximum ? à quel signe reconnaîtra-t-on que ce maximum est atteint ? à quel signe reconnaîtra-t-on si la vapeur est employée le plus avantageusement possible à la production de la puissance motrice ?

Puisque tout rétablissement d'équilibre dans le calorique peut être la cause de la production de la puissance motrice, tout rétablissement d'équilibre qui se fera sans production de cette puissance devra être considéré comme une véritable perte : or, pour peu qu'on y réfléchisse, on s'apercevra que tout changement de température qui n'est pas dû à un changement de volume des corps ne peut être qu'un rétablissement inutile d'équilibre dans le calorique (1). La condition nécessaire du maximum est donc *qu'il ne se fasse dans les corps employés à réaliser la puissance motrice de la chaleur aucun changement de température qui ne soit dû à un changement de volume.*

(1) Nous ne supposons ici aucune action chimique entre les corps mis en usage pour réaliser la puissance motrice de la chaleur. L'action chimique qui se passe dans le foyer est une action en quelque sorte préliminaire, une opération destinée, non à produire immédiatement de la puissance motrice, mais à rompre l'équilibre du calorique, à produire une différence de température qui doit ensuite donner naissance au mouvement.

Réciproquement, toutes les fois que cette condition sera remplie, le maximum sera atteint.

Ce principe ne doit jamais être perdu de vue dans la construction des machines à feu ; il en est la base fondamentale. Si l'on ne peut pas l'observer rigoureusement, il faut du moins s'en écarter le moins possible.

Tout changement de température qui n'est pas dû à un changement de volume ou à une action chimique (action que provisoirement nous supposons ne pas se rencontrer ici) est nécessairement dû au passage direct du calorique d'un corps plus ou moins échauffé à un corps plus froid. Ce passage a lieu principalement au contact de corps de températures diverses : aussi un pareil contact doit-il être évité autant que possible. Il ne peut pas être évité complètement, sans doute ; mais il faut du moins faire en sorte que les corps mis en contact les uns avec les autres diffèrent peu entre eux de température.

Lorsque nous avons supposé tout à l'heure, dans notre démonstration, le calorique du corps A employé à former de la vapeur, cette vapeur était censée prendre naissance à la température même du corps A : ainsi le contact n'avait lieu qu'entre des corps de températures égales ; le changement de température arrivé ensuite dans la vapeur était dû à la dilatation,

par conséquent à un changement de volume ; enfin la condensation s'opérait aussi sans contact de corps de températures diverses. Elle s'opérait en exerçant une pression constante sur la vapeur mise en contact avec le corps B de même température qu'elle. Les conditions du maximum se trouvaient donc remplies. A la vérité les choses ne peuvent pas se passer rigoureusement comme nous l'avons supposé. Pour déterminer le passage du calorique d'un corps à l'autre , il faut dans le premier un excès de température ; mais cet excès peut être supposé aussi petit qu'on le voudra ; on peut le regarder comme nul en théorie , sans que pour cela les raisonnemens perdent rien de leur exactitude.

L'on peut faire à notre démonstration une objection plus réelle , que voici :

Lorsque l'on emprunte du calorique au corps A , pour donner naissance à de la vapeur , et que cette vapeur est ensuite condensée par son contact avec le corps B , l'eau employée à la former et que l'on supposait d'abord à la température du corps A se trouve , à la fin de l'opération , à la température du corps B ; elle s'est refroidie. Si l'on veut recommencer une opération semblable à la première , si l'on veut développer une nouvelle quantité de puissance

motrice avec le même instrument, avec la même vapeur, il faut d'abord rétablir les choses dans leur état primitif, il faut rendre à l'eau le degré de température qu'elle avait d'abord. Cela peut se faire sans doute en la remettant immédiatement en contact avec le corps A ; mais il y a alors contact entre des corps de températures diverses et perte de puissance motrice (1) : il deviendrait impossible d'exécuter l'opération inverse, c'est-à-dire de faire retourner au corps A le calorique employé à élever la température du liquide.

(1) Ce genre de perte se rencontre dans toutes les machines à vapeur : en effet, l'eau destinée à alimenter la chaudière est toujours plus froide que l'eau qui y est déjà contenue ; il se fait entre elles un rétablissement inutile d'équilibre dans le calorique. On se convaincra aisément *à posteriori* que ce rétablissement d'équilibre entraîne une perte de puissance motrice, si l'on réfléchit qu'il eût été possible d'échauffer préalablement l'eau d'alimentation en l'employant comme eau de condensation dans une petite machine accessoire, où l'on eût fait usage de la vapeur tirée de la grande chaudière et où la condensation se fût opérée à une température intermédiaire entre celle de la chaudière et celle du condenseur principal. La force produite par la petite machine n'eût coûté aucune dépense de chaleur, puisque toute celle qui eût été employée serait rentrée dans la chaudière avec l'eau de condensation.

Cette difficulté peut être levée en supposant la différence de température entre le corps A et le corps B infiniment petite ; la quantité de chaleur nécessaire pour reporter le liquide à sa température première sera aussi infiniment petite et négligeable relativement à celle qui est nécessaire pour donner naissance à la vapeur, quantité toujours finie.

La proposition, se trouvant d'ailleurs démontrée pour le cas où la différence entre les températures des deux corps est infiniment petite, sera facilement étendue au cas général. En effet, s'il s'agissait de faire naître la puissance motrice par le transport du calorique du corps A au corps Z, la température de ce dernier corps étant fort différente de celle du premier, on imaginerait une suite de corps B, C, D, etc., de températures intermédiaires entre celles des corps A, Z, et choisies de manière à ce que les différences de A à B, de B à C, etc., soient toutes infiniment petites. Le calorique émané de A n'arriverait à Z qu'après avoir passé par les corps B, C, D, etc., et après avoir développé dans chacun de ses transports le maximum de puissance motrice. Les opérations inverses seraient ici toutes possibles, et le raisonnement de la pag. 20 deviendrait rigoureusement applicable.

D'après les notions établies jusqu'à présent, on peut comparer avec assez de justesse la puissance motrice de la chaleur à celle d'une chute d'eau : toutes deux ont un maximum que l'on ne peut pas dépasser, quelle que soit d'une part la machine employée à recevoir l'action de l'eau, et quelle que soit de l'autre la substance employée à recevoir l'action de la chaleur. La puissance motrice d'une chute d'eau dépend de sa hauteur et de la quantité du liquide ; la puissance motrice de la chaleur dépend aussi de la quantité de calorique employé, et de ce qu'on pourrait nommer, de ce que nous appellerons en effet la hauteur de sa chute (1), c'est-à-dire de la différence de température des corps entre lesquels se fait l'échange du calorique. Dans la chute d'eau, la puissance motrice est rigoureusement proportionnelle à la différence de niveau entre le réservoir supérieur et le réservoir inférieur. Dans la chute du calorique, la puissance motrice augmente sans doute avec la différence de température entre le corps chaud et le corps froid ; mais nous

(1) La matière ici traitée étant tout à fait nouvelle, nous sommes forcés d'employer des expressions encore inusitées et qui n'ont peut-être pas toute la clarté désirable.

ignorons si elle est proportionnelle à cette différence. Nous ignorons, par exemple, si la chute du calorique de 100° à 50° fournit plus ou moins de puissance motrice que la chute de ce même calorique de 50° à 0° . C'est une question que nous nous proposons d'examiner plus tard.

Nous allons donner ici une seconde démonstration de la proposition fondamentale énoncée pag. 22, et présenter cette proposition sous une forme plus générale que nous ne l'avons fait ci-dessus.

Lorsqu'un fluide gazeux est rapidement comprimé, sa température s'élève; elle s'abaisse au contraire lorsqu'il est rapidement dilaté. C'est là un des faits les mieux constatés par l'expérience : nous le prendrons pour base de notre démonstration (1).

Si, lorsqu'un gaz s'est élevé de température

(1) Les faits d'expérience qui prouvent le mieux le changement de température des gaz par la compression ou la dilatation sont les suivans :

1° L'abaissement du thermomètre placé sous le récipient d'une machine pneumatique où l'on fait le vide. Cet abaissement est très-sensible sur le thermomètre de Breguet : il peut aller au delà de 40 à 50 degrés. Le nuage qui se forme dans cette occasion semble devoir être at-

par l'effet de la compression, l'on veut le ra-

ribué à la condensation de la vapeur d'eau causée par le refroidissement de l'air.

2° L'inflammation de l'amadou dans les briquets dit pneumatiques, qui sont, comme on sait, de petits corps de pompe où l'on fait éprouver à l'air une compression rapide;

3° L'abaissement du thermomètre placé dans une capacité où, après avoir comprimé de l'air, on le laisse échapper par l'ouverture d'un robinet;

4° Les résultats d'expérience sur la vitesse du son. M. de Laplace a fait voir que, pour soumettre exactement ces résultats à la théorie et au calcul, il fallait admettre l'échauffement de l'air par une compression subite.

Le seul fait qui puisse être opposé à ceux-ci est une expérience de MM. Gay-Lussac et Welter, décrite dans les *Annales de physique et de chimie*. Une petite ouverture ayant été faite à un vaste réservoir d'air comprimé, et la boule d'un thermomètre ayant été présentée au courant d'air qui sortait par cette ouverture, l'on n'a pas observé d'abaissement sensible dans le degré de température marqué par le thermomètre.

L'on peut donner à ce fait deux explications : 1° le frottement de l'air contre les parois de l'ouverture par laquelle il s'échappe développe peut-être de la chaleur en quantité notable; 2° l'air qui vient toucher immédiatement la boule du thermomètre reprend peut-être, par son choc contre cette boule, ou plutôt par l'effet du détour qu'il est forcé de prendre à sa rencontre, une densité égale à celle qu'il avait dans le récipient, à peu près

mener à sa température primitive sans faire subir à son volume de nouveaux changemens, il faut lui enlever du calorique. Ce calorique pourrait aussi être enlevé à mesure que la compression s'exécute, de manière à ce que la température du gaz restât constante. De même, si le gaz est raréfié, l'on peut éviter qu'il ne baisse de température en lui fournissant une certaine quantité de calorique. Nous appellerons le ca-

comme l'eau d'un courant s'élève, contre un obstacle fixe, au-dessus de son niveau.

Le changement de température occasioné dans les gaz par le changement de volume peut être regardé comme l'un des faits les plus importants de la physique, à cause des nombreuses conséquences qu'il entraîne, et en même temps comme l'un des plus difficiles à éclaircir et à mesurer par des expériences décisives. Il semble présenter dans plusieurs circonstances des anomalies singulières.

N'est-ce pas au refroidissement de l'air par la dilatation qu'il faut attribuer le froid des régions supérieures de l'atmosphère ? Les raisons données jusqu'ici pour expliquer ce froid sont tout-à-fait insuffisantes : on a dit que l'air des régions élevées, recevant peu de chaleur réfléchi par la terre, et rayonnant lui-même vers les espaces célestes, devait perdre du calorique, et que c'était là la cause de son refroidissement; mais cette explication se trouve détruite si l'on remarque qu'à égale hauteur le froid règne aussi bien et même avec plus d'intensité sur les plaines élevées que sur le sommet des montagnes, ou que dans les parties d'atmosphère éloignées du sol.

lorique employé dans ces occasions où il ne se fait aucun changement de température, calorique dû au changement de volume. Cette dénomination n'indique pas que le calorique appartienne au volume, il ne lui appartient pas plus qu'il n'appartient à la pression, et pourrait être tout aussi bien appelé calorique dû au changement de pression. Nous ignorons quelles lois il suit relativement aux variations de volume: il est possible que sa quantité change soit avec la nature du gaz, soit avec sa densité, soit avec sa température. L'expérience ne nous a rien appris sur ce sujet; elle nous a appris seulement que ce calorique se développe en quantité plus ou moins grande par la compression des fluides élastiques.

Cette notion préliminaire étant posée, imaginons un fluide élastique, de l'air atmosphérique par exemple, renfermé dans un vaisseau cylindrique *abcd*, fig. 1, muni d'un diaphragme mobile ou piston *cd*; soient en outre les deux corps A, B, entretenus chacun à une température constante, celle de A étant plus élevée que celle de B; figurons-nous maintenant la suite des opérations qui vont être décrites :

1^o Contact du corps A avec l'air renfermé dans la capacité *abcd*, ou avec la paroi de cette

capacité, paroi que nous supposons transmettre facilement le calorique. L'air se trouve par ce contact à la température même du corps A; *cd* est la position actuelle du piston.

2°. Le piston s'élève graduellement, et vient prendre la position *ef*. Le contact a toujours lieu entre le corps A et l'air, qui se trouve ainsi maintenu à une température constante pendant la raréfaction. Le corps A fournit le calorique nécessaire pour maintenir la constance de température.

3°. Le corps A est éloigné, et l'air ne se trouve plus en contact avec aucun corps capable de lui fournir du calorique; le piston continue cependant à se mouvoir, et passe de la position *ef* à la position *gh*. L'air se raréfie sans recevoir de calorique, et sa température s'abaisse. Imaginons qu'elle s'abaisse ainsi jusqu'à devenir égale à celle du corps B: à ce moment le piston s'arrête et occupe la position *gh*.

4°. L'air est mis en contact avec le corps B; il est comprimé par le retour du piston, que l'on ramène de la position *gh* à la position *cd*. Cet air reste cependant à une température constante, à cause de son contact avec le corps B auquel il cède son calorique.

5°. Le corps B est écarté, et l'on continue la

compression de l'air, qui, se trouvant alors isolé, s'élève de température. La compression est continuée jusqu'à ce que l'air ait acquis la température du corps A. Le piston passe pendant ce temps de la position *cd* à la position *ik*.

6°. L'air est remis en contact avec le corps A; le piston retourne de la position *ik* à la position *ef*; la température demeure invariable.

7°. La période décritesous le n° 3 se renouvelle, puis successivement les périodes 4, 5, 6, 3, 4, 5, 6, 3, 4, 5, ainsi de suite.

Dans ces diverses opérations, le piston éprouve un effort plus ou moins grand de la part de l'air renfermé dans le cylindre; la force élastique de cet air varie, tant à cause des changemens de volume que des changemens de température; mais l'on doit remarquer qu'à volume égal, c'est-à-dire pour des positions semblables du piston, la température se trouve plus élevée pendant les mouvemens de dilatation que pendant les mouvemens de compression. Pendant les premiers, la force élastique de l'air se trouve donc plus grande et par conséquent la quantité de puissance motrice produite par les mouvemens de dilatation est plus considéra-

ble que celle qui est consommée pour produire les mouvemens de compression. Ainsi , l'on obtiendra un excédant de puissance motrice , excédant dont on pourra disposer pour des usages quelconques. L'air nous a donc servi de machine à feu ; nous l'avons même employé de la manière la plus avantageuse possible , car il ne s'est fait aucun rétablissement inutile d'équilibre dans le calorique.

Toutes les opérations ci-dessus décrites peuvent être exécutées dans un sens et dans un ordre inverses. Imaginons qu'après la sixième période, c'est-à-dire le piston étant arrivé à la position *ef*, on le fasse revenir à la position *ik*, et qu'en même temps on maintienne l'air en contact avec le corps A : le calorique fourni par ce corps, pendant la sixième période, retournera à sa source, c'est-à-dire au corps A, et les choses se trouveront dans l'état où elles étaient à la fin de la période cinquième. Si maintenant on écarte le corps A, et que l'on fasse mouvoir le piston de *ef* en *cd*, la température de l'air décroîtra d'autant de degrés qu'elle s'est accrue pendant la période cinquième, et deviendra celle du corps B. L'on peut évidemment continuer une suite d'opérations inverses de celles que nous avons d'abord décrites : il suffit de se placer

dans les mêmes circonstances et d'exécuter pour chaque période un mouvement de dilatation au lieu d'un mouvement de compression, et réciproquement.

Le résultat des premières opérations avait été la production d'une certaine quantité de puissance motrice et le transport du calorique du corps A au corps B ; le résultat des opérations inverses est la consommation de la puissance motrice produite, et le retour du calorique du corps B au corps A : de sorte que ces deux suites d'opérations s'annulent, se neutralisent en quelque sorte l'une l'autre.

L'impossibilité de faire produire au calorique une quantité de puissance motrice plus grande que celle que nous en avons obtenue par notre première suite d'opérations est maintenant facile à prouver. Elle se démontrera par un raisonnement entièrement semblable à celui dont nous avons fait usage pag. 20. Le raisonnement aura même ici un degré d'exactitude de plus : l'air dont nous nous servons pour développer la puissance motrice est ramené, à la fin de chaque cercle d'opérations, précisément à l'état où il se trouvait d'abord, tandis qu'il n'en était pas tout-à-fait de même pour la va-

peur d'eau, ainsi que nous l'avons remarqué (1).

Nous avons choisi l'air atmosphérique comme l'instrument qui devait développer la puissance motrice de la chaleur; mais il est évident que les raisonnemens eussent été les mêmes pour toute autre substance gazeuse, et même pour tout autre corps susceptible de changer de température par des contractions et des dilatations successives, ce qui comprend tous les corps de la nature, ou du

(1) Nous supposons implicitement dans notre démonstration que, lorsqu'un corps a éprouvé des changemens quelconques et qu'après un certain nombre de transformations il est ramené identiquement à son état primitif, c'est-à-dire à cet état considéré relativement à la densité, à la température, au mode d'agrégation, nous supposons, dis-je, que ce corps se trouve contenir la même quantité de chaleur qu'il contenait d'abord, ou autrement, que les quantités de chaleur absorbées ou dégagées dans ses diverses transformations sont exactement compensées. Ce fait n'a jamais été révoqué en doute; il a été d'abord admis sans réflexion et vérifié ensuite dans beaucoup de cas par les expériences du calorimètre. Le nier, ce serait renverser toute la théorie de la chaleur, à laquelle il sert de base. Au reste, pour le dire en passant, les principaux fondemens sur lesquels repose la théorie de la chaleur auraient besoin de l'examen le plus attentif. Plusieurs faits d'expérience paraissent à peu près inexplicables dans l'état actuel de cette théorie.

moins tous ceux qui sont propres à réaliser la puissance motrice de la chaleur. Ainsi nous sommes conduits à établir la proposition générale que voici :

La puissance motrice de la chaleur est indépendante des agens mis en œuvre pour la réaliser; sa quantité est fixée uniquement par les températures des corps entre lesquels se fait en dernier résultat le transport du calorique.

Il faut sous-entendre ici que chacune des méthodes de développer la puissance motrice atteint la perfection dont elle est susceptible. Cette condition se trouvera remplie si, comme nous l'avons remarqué plus haut, il ne se fait dans les corps aucun changement de température qui ne soit dû à un changement de volume, ou, ce qui est la même chose autrement exprimée, s'il n'y a jamais de contact entre des corps de températures sensiblement différentes.